

地基微波辐射计探测在黄河上游 人工增雨中的应用

王黎俊¹ 孙安平¹ 刘彩红² 赵 凯³

(1. 青海省人工影响天气办公室 810001; 2. 南京信息工程大学;
3. 中国科学院东北地理研究所)

提 要: 利用2003、2004年夏秋季在青海省河南县的地基双频段微波辐射计连续观测资料,在实施系统探测实验以进行辐射亮温值($T_{B(23.87)}$, $T_{B(31.65)}$)与大气汽态总水汽含量(Q)和云中积分液态水含量(L)值反演处理的基础上,分析了黄河上游河曲地区的云水特征,并进行了降水预测及人工增雨作业指标的探讨。结果表明:在黄河上游河曲地区,7—9月纯晴天无云天气条件下, L 值基本为0,表明了统计回归反演的显著性。多云条件下 Q 值和 L 值分别在 $3.76\sim 4.75\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $227.34\sim 859.42\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的范围内。可降水云天气, Q 值在 $5.23\sim 8.65\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 间, L 值在 $421.18\sim 1016.37\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 的范围内;积雨云个例分析表明,在降雨开始前近5小时的降雨酝酿期内, Q 及 L 的增加有明显的波动,但在对流的云出现并发展时, Q 和 L 总是急剧上升,在降雨前达到一峰值;由河南站和西安站的 Q 、 L 值比较差异可以看出, Q 、 L 值受水汽输送、地形等因素的影响,黄河上游河曲地区的人工增雨潜力有显著的优势;所计算出的降水预测阈值,可作为该地区人工增雨作业指标的参考。

关键词: 微波辐射计 辐射亮温 大气汽态总水汽含量 云中积分液态水含量 人工影响天气

Application of Ground-Based Microwave Radiometer Detection to Precipitation Enhancement in the Upper of the Yellow River

Wang Lijun¹ Sun Anping¹ Liu Caihong² Zhao Kai³

(1. Weather Modification Office of Qinghai Province, Xining 810001; 2. Nanjing University of Information Science & Technology; 3. Northeast Geography Institute, Chinese Academy of Sciences)

Abstract: The ground-based dual-wavelength microwave radiometer system was applied to detect the precipitable water vapor (Q) and path-integrated cloud liquid water (L) in Henan County of

Qinghai from July to September in 2003, 2004. The cloud water feature was analyzed by using the data from the microwave radiometer, and an experiment of weather modification is preliminary conducted. The result indicated that there is a certain range of both Q and L under the various atmospheric conditions, for which the retrieval model is effective. For the cumulonimbus case, there is an obvious fluctuation in both Q and L in advance of five hours of precipitation. Then, the convective cloud developed and Q and L had a sharp increase. Data comparison between Henan and Xi'an stations shows that Q and L were influenced by the terrain and vapor transportation. The former station has a better potentiality of precipitation enhancement than the later. The calculated threshold of precipitation has reference value for the operation of weather modification in the upper reaches of the Yellow River.

Key Words: microwave radiometer radiation brightness temperature total water-vapor content cloud integrated liquid water content weather modification

引 言

黄河上游人工增雨是开发利用空中云水资源、缓解黄河上游水资源短缺的有效新途径。基于冷云催化理论,确定自然云是否有催化意义,最重要的先决条件就是云中是否含有足够的过冷水存在。地基微波辐射计通过接受某些特定频段的大气辐射信息,便可推断出大气中的汽态水和液态水含量。从而对云降水物理及人工影响天气的研究提供有力的监测手段。

1980年代初,地基微波遥感技术在国际上开始应用于云物理研究中。1984年,Mark Heggli^[1]利用地基微波辐射计对美国西部内华达山脉冬季风暴云系中的液态水分布进行了连续跟踪遥测。1988年Warner对微波辐射计测量液态水精度进行了研究,确认了其可行性。1990年代后,国内气象学家对此方面的研究也取得了一些进展:朱元□等^[2]连续监测河北省的大气总含水量和云中液态水积分含量,为地基微波辐射计应用于人工影响天气领域提供了技术条件;雷恒池等^[3]利用双通道地基微波辐射计在陕西对降水云系进行探测,认为降雨开始前,云中水汽含量

和垂直路径积分云液水含量均有跃增现象,提出人工增雨最佳作业区。魏重等^[4]认为在雨强小于 $20\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 范围内,都可由地基辐射计测值定量得到水汽总量和云液水总量。

通过在黄河上游人工增雨基地(青海省河南县)“HMR-DF”型地基双频段微波辐射计的探测实验,系统地进行大气中汽态总水汽含量 Q 值和云中积分液态水含量 L 值的统计回归反演,由微波辐射计的实测数据资料,分析黄河上游河曲地区的云水特征,以进一步了解该地区云物理特征,并在此基础上,进行降水预测及人工增雨作业指标的探讨,为黄河上游人工增雨作业的有效实施提供一定的理论依据。

1 实验仪器及资料处理

“HMR-DF”型地基双频段微波辐射计工作主频采用 31.65GHz 和 23.87GHz 频段,可 $0\sim 90^\circ$ 仰角、 360° 全方位角观测,方位、仰角的控制采用细分步进电机,工作环境温度 $-10^\circ\text{C}\sim +50^\circ\text{C}$,数据采集、探测采用一台计算机控制。理论上可全天候24小时连续观测。因目前,雨水对微波辐射计探测结果的影响还没有有效的订正方法,在对资料统

计分析处理的过程中,剔除了降雨时段及降雨影响期间的资料,以保证资料可靠性。

2 实验观测设计

2.1 遥测大气中汽态总水汽含量和云中积分液态水含量

应用微波辐射计观测实验时,采取天线朝着天顶方向(即 90° 仰角)的观测方式,得到垂直气柱路径积分大气水汽总量 Q 和云液水 L 。仪器昼夜连续测量,设定观测精度为1秒。

大气中汽态总水汽含量:

$$Q = \int_0^{\infty} \rho_v dz \quad (1)$$

式(1)表示大气中汽态总水汽含量 Q 等于大气中的水汽密度 ρ_v 从地面到大气上界的垂直积分。

云中积分液态水含量

$$L = \int_{z_1}^{z_2} \rho_L dz \quad (2)$$

式(2)表示云中积分液态水含量 L 等于云中液态水密度 ρ_L 从云底到云顶的垂直积分。 z_1 、 z_2 分别为云底和云顶的高度。

微波频道 23.87GHz 位于大气中水分子吸收带的峰值,31.65GHz 位于大气窗区,接收这两个频段的大气辐射信息,由此便可以推算大气中汽态水和液态水的含量。而微波辐射计本身探测给出的是辐射亮温的变化,微波辐射计的初始观测系统仅输出观测数码值和亮温值数据。

忽略云和大气的散射(在 $20\sim 60$ GHz微波波段可忽略),并进行了 Rayleigh-Jeans 近似处理后的微波辐射计遥感基本方程为:

$$T_B(\theta, \nu) = T_\infty \exp\left[-\int_0^{\infty} \alpha(z) \sec\theta dz\right] + \int_0^{\infty} T(z) \alpha(z) \exp\left[-\int_0^{\infty} \alpha(z) \sec\theta dz\right] \sec\theta dz \quad (3)$$

式中: $T_B(\theta, \nu)$ 为地面接收到的辐射亮温, T_∞ 取 2.70 K, $\alpha(z)$ 为吸收系数,与大气中水汽和

云中液态水密度有关, θ 是天顶角, $T(z)$ 为温度廓线。

微波辐射亮温主要由大气中总水汽含量 Q 和云中积分液态水含量 L 所引起的,而且当大气中总水汽含量 Q 或云中积分液态水含量 L 增加时,亮温 $T_B(\theta, \nu)$ 也会增加, $T_B(\theta, \nu)$ 和 Q 、 L 有近似线性的关系,这种关系为用统计反演方法求出 Q 和 L 提供了理论依据。其中温度廓线 $T(z)$ 变化所引起的亮温变化是一个小量,可略去,使计算得以简化。可利用统计回归方法建立大气中汽态水和液态水含量与双通道辐射亮温的统计关系式。

2.2 统计回归反演

选取 2003 年 10 月 1—17 日黄河上游人工增雨示范区综合地面观测试验期间所取得的加密探空资料,进行大气中汽态水和液态水含量与双通道辐射亮温的统计回归反演。对探空资料进行计算处理后采用相对湿度域值的方法确定云层厚度,并把云中含水量分为 12 级(0.01, 0.04, 0.07, 0.10, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.20, 0.23, 0.26, $0.30 \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),按式(3)模拟计算出两频段在 90° 仰角方向上的辐射亮温,同时也计算出汽态水和液态水含量。

用 T_{B1} 和 T_{B2} 分别表示 31.65GHz 和 23.87GHz 在 90° 仰角方向上的辐射亮温。考虑到观测期间加密探空站点与微波辐射计观测点有一定的距离,且海拔高度存在较大的差异,探空资料不能完全反映微波辐射计双通道辐射亮温的变化,所以在进行统计回归反演时,未引入多次项的非完全线性处理和地面温度、湿度及压强为参数项的处理,只进行一次交叉项的简化处理,即假定线性关系式:

$$Q = A_0 + A_1 T_{B1} + A_2 T_{B2} \quad (4)$$

$$L = B_0 + B_1 T_{B1} + B_2 T_{B2} \quad (5)$$

利用上述样本资料,进行逐步回归运算,得到回归系数。确定拟合方程为:

$$Q = -389.96 + 14.0148 T_{B(23,87)} - 0.6982 T_{B(31,65)} \quad (6)$$

$$L = -126.56 - 0.0737 T_{B(23,87)} + 0.2940 T_{B(31,65)} \quad (7)$$

由此拟合关系式,编制程序存入微波辐射计的观测资料处理及显示系统中。这样在进行观测实验时,从微波辐射计的输出显示系统界面中,即可同步输出大气中汽态总水汽含量 Q 值和云中积分液态水含量 L 值,为人工增雨作业和进行人工影响天气研究提供了实测数据。

3 黄河上游大气中总水汽含量和积分液态水含量的统计特征

利用 2004 年 7—9 月经过反演处理后的微波辐射计连续观测资料,对黄河上游河曲地区晴天和常见云状出现时的大气中汽态总水汽含量 Q 值和云中积分液态水含量 L 值分别进行统计分析,以考察该地区夏秋季在不同天气和云状条件下水汽含量 Q 和云液水含量 L 随不同月份的演变情况。表 1 给出了连续观测期间 Q 和 L 的月平均值。月平均值的求取以结合河南站定时观测的云状资料进行统计平均方法处理,并剔除了降雨时段及天线附水、积水时段的资料。

表 1 2004 年 7—9 月黄河上游河曲地区不同云状的 Q 和 L 月平均状况

云状	7月		8月		9月	
	$Q/g \cdot cm^{-2}$	$L/g \cdot cm^{-2}$	$Q/g \cdot cm^{-2}$	$L/g \cdot cm^{-2}$	$Q/g \cdot cm^{-2}$	$L/g \cdot cm^{-2}$
无云晴天	2.21	0.01	2.75	0.01	2.34	0.01
Cu cong Cu hum Fc	3.32	87.34	3.23	156.75	3.18	43.13
Cb cap	6.79	803.98	8.53	1016.37	5.41	421.10
Sc tra	4.60	227.34	4.75	478.44	4.14	325.46
Sc op	5.476	79.55	5.97	679.55	5.23	542.71
As tra	3.76	795.02	3.88	859.42	4.31	535.49
As op	6.28	875.30	6.56	750.15	8.65	753.18

由表 1 可见, Q 值的月变化幅度不明显,但 8 月份为最大,而 L 值不仅随云量和云状有变化,而且有较明显的月变化,除 As op(7 月份最高)外,其它主要可降水云(Cb cap、Sc op)的 L 值在 8 月份最大,即黄河上游地区上空水汽总量和云液水含量在 8 月份为最高。

(1) 在纯晴天的无云天气条件下, L 基本接近于 0,验证了统计回归反演的显著性; Q 值月变化不明显。

(2) 多云(一般云量为 7 成~10⁻,以 Sc tra 和 As tra 等云状居多)天气条件下,7~9 月 Q 值在 3.76~4.75 $g \cdot cm^{-2}$ 范围内, L 值在 227.34~859.42 $g \cdot m^{-2}$ 的范围内。

(3) 漫天可降水云(Cb cap、Sc op 和 As op 等云状)天气条件下,7~9 月 Q 值在 5.23~8.65 $g \cdot cm^{-2}$ 范围内, L 值在 421.18~

1016.37 $g \cdot m^{-2}$ 的范围内。以积雨云的 Q 值和 L 值为最大。

4 个例分析

黄河上游河曲地区夏季的降水大多数是对流性降水,并且降水云系以强对流性云系(Cb)为主^[5]。以微波辐射计天线对着天顶定点观测,当降雨系统本站上空时,可清楚地探测到降水云系在降雨前 Q 和 L 的随时间的演变过程。

结合 2004 年黄河上游人工增雨作业期间观测到的较为典型的强对流云降水过程,对黄河上游河曲地区对流云连续演变情况进行分析。

图 1 给出了河南县站 2004 年 7 月 15 日

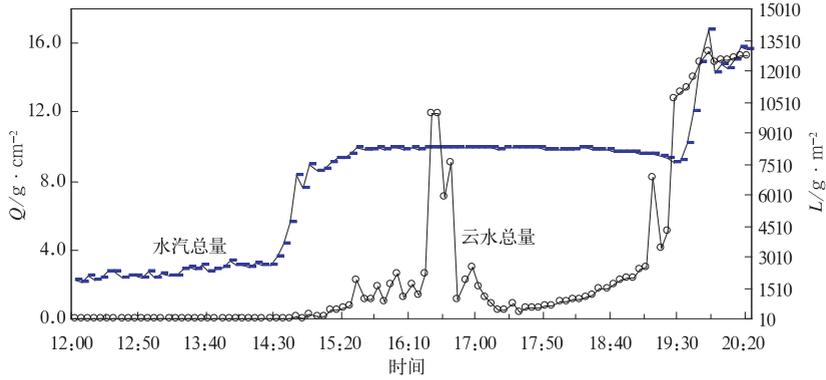


图 1 2004 年 7 月 15 日 Q 、 L 随时间变化序列

一次积雨云降水过程中所观测到的 Q 和 L 随时间的演变情况。整个降雨过程持续近 2 小时,过程总降雨量为 10.2mm。在该降水过程发生前两天内测站一直无降水出现。7 月 15 日 12:00—14:00 测站周边只有极少量的碎积云, Q 和 L 一直比较稳定, L 值基本为 0。约 14:00 后,逐渐有浓积云(Cu cong)、淡积云(Cu hum)等在测站顶空出现,且云量逐渐增多、增厚。当浓积云经过测站顶空时, Q 值随之急剧上升,并随着云厚的增加,由 14:30 的 $3.5\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 增大到 15:30 的 $9.9\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$,之后基本没有明显的变化,只在降水出现前有小幅度的减小。而 L 值在 14:40 后也逐渐开始增加,在经过几个小峰值的起伏后,在 16:25 急速上升到 $9964.5399\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$,在这一峰值维持约 5 分钟后,又急剧下降,经过一个小起伏后再次缓慢上升,在 19:05~19:05 又有一较大的起伏。19:25 测站出现降水,由于微波辐射计天线着水、附水等原因, Q 和 L 值急剧跃升,数据失真,故对降水过程中的 Q 和 L 的变化暂不作分析。

对该强对流云降水的连续观测表明,在降雨开始前近 5 小时的降雨酝酿期内, Q 及 L 的增加并不是直线持续上升,尤其是 L 值的演变有较大的起伏。云液水含量的变化和水汽并不同步,但在对流的云出现并发展的时候, Q 和 L 总是急剧上升,在降雨前都能达到一峰值。

5 高原与内地平原地区汽态水和液态水的比较

根据 2003 年、2004 年 8 月和 9 月剔除了降雨时段后的 Q 、 L 值进行统计平均,与西安市 1997 年观测结果相比较。

表 2 黄河上游河曲地区与西安 Q 、 L 值对比表

月份	河南		西安	
	$Q/\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	$L/\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	$Q/\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	$L/\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$
8 月	10.7	99.3	6.5	87.5
9 月	9.9	91.4	3.4	96.7

黄河上游河曲地区地处多层、多源水汽相汇地区,高空水汽充足,云中液态水含量高,降水过程多,年平均降水量在 590.4~762.2mm 之间。并且这一地区河流纵横,地势平坦,沼泽遍布,几百条大小河流从两岸汇入黄河干流,空气比湿高^[5-6]。由表 2 可以看出,黄河上游河曲地区与西安市区的观测值存在着显著的差异, Q 值较西安地区的高出近一倍,而 L 值却相当。这可能与地形、水汽输送、天气系统的演变等条件的巨大差异有关,同时可说明黄河上游河曲地区的人工增雨潜力相对内陆平原地区在云的微观条件上有显著优势的可能性。

6 降水预测及人工增雨作业指标的探讨

分析河南县站 2004 年 6—9 月的微波辐

射计观测资料发现,当 Q 和 L 达到一定值,并且当 L 的增加率达到一定条件值时,即可出现降水。这样就可以预测未来该可降水云系是否有降雨及其开始时间,因此,根据降水云系降水前云中 Q 和 L 值大小及其变率,可作降雨开始时间的预测。对将 2004 年 7 月、8 月和 9 月微波辐射计观测的降水前 Q 、 L 值进行统计平均,定出降水预测开始时的 Q 和 L 大小及 L 的变率阈值(如表 3 所示),可作为黄河上游河曲地区人工增雨作业指标的参考。

表 3 降水预测开始时的 Q 和 L 大小及 L 的变率阈值表

月份	$Q/g \cdot cm^{-2}$	$L/g \cdot cm^{-2}$	$\Delta L/\Delta T$
7 月	9.7	87.1	259
8 月	10.3	99.7	145
9 月	9.1	89.1	231

7 小 结

(1) 经过探测实验和观测分析,所给出的用于反演 Q 、 L 值的拟合方程适用于“HMR-DF”型地基微波辐射计在黄河上游河曲地区对水汽和云液水的连续观测。

(2) 黄河上游河曲地区 7—9 月, Q 值的月变化幅度不明显,而 L 值不仅随云量和云状有变化,而且有较明显的月变化。

(3) 强对流云系在降雨前,云中水汽和云液水含量有明显的跃增现象,并且云液水含量有幅度较大的多次起伏,其意义可能在于进行着复杂的云滴向雨滴的转化过程,成为降雨形成的“孕育区”。同时可意味着用于预测降雨出现和进行人工催化作业指标制定的可能。

(4) 对 Q 、 L 值月统计平均结果表明,黄河上游河曲地区与西安地区的观测值存在着显著的差异, Q 值高出近一倍,而 L 值却与平原地区相当。这可能与地形、水汽输送、天气系统的演变等条件的巨大差异有关,同时可说明黄河上游河曲地区的人工增雨潜力相

对内陆平原地区在云的微观条件上有显著的优势。

(5) 根据对降水前 Q 、 L 值的统计平均给出了降水预测阈值,可作为黄河上游河曲地区人工增雨作业指标的参考。

参考文献

- [1] Heggli Mark, Rauber Robert M, Snider J B. Field evaluation of a dual-channel microwave radio meter designed for measurement of integrated water vapor and cloud liquid water in the atmosphere. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 1987, 4: 204-213.
- [2] 朱元口,胡成达,甄进明,等. 微波辐射计在人工影响天气中的应用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1994, (5): 22-25.
- [3] 雷恒池,魏重,沈志来,等. 微波辐射计探测降雨前水汽和云液水[J]. 应用气象学报, 2001, 增刊: 41-43.
- [4] 魏重,雷恒池,沈志来. 地基微波辐射计的雨天探测[J]. 应用气象学报, 2001, (12): 65-71.
- [5] 王黎俊,孙安平. 黄河上游人工增雨基地地区云及降水特征分析[J]. 青海气象, 2003, (3): 34-38.
- [6] 德力格尔,李仑格. 黄河上游地区大气云水资源的开发和应用[J]. 青海气象, 2002, (3): 19-21.
- [7] 梁谷,李燕,岳治国,等. 地基微波辐射计探测空中水个案分析[J]. 陕西气象, 2005, (1): 17-18.
- [8] 黄彦彬,德力格尔,王振会. 利用地基双通道微波辐射计遥感青藏高原高原大气云水特征[J]. 南京气象学院学报, 2003, (3): 14-17.
- [9] 李万彪,刘盈辉,朱元口,等. HUBEX 试验地基微波辐射计的反演资料的应用研究[J]. 气候与环境研究, 2001, (1): 19-27.
- [10] 周秀骥. 大气微波辐射及遥感原理[M]. 北京: 科学出版社, 1982. 43-65.
- [11] DuanYing, Wu Zhihui, Shi Lixin. Measurement of Liquid Water Content in Clouds with a Ground-Based Microwave Radiometer. WMO Workshop on Measurements of Cloud Properties for Forecasts of Water, Air Quality and Climate. Mexico city, June, 1997, 23-27.
- [12] 唐林,王治平,丁岳强,等. 湖南省柘溪水库流域空中水汽资源特征及人工增雨潜力. 气象, 2006, 32(5): 29-34.
- [13] 黄庚,李淑日,德力格尔,等. 黄河上游云凝结核观测研究. 气象, 28(10): 45-49.
- [14] 龚佃利,边道相. 山东省飞机增雨天气系统云水资源转化特征分析. 气象, 28(8): 15-19.
- [15] 李娟,黄庚. 黄河上游地区大气冰核浓度的观测研究. 气象, 27(11): 8-12.